

Dimensionamento de reforço à flexão em vigas de concreto armado com polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC): comparativo entre as normas NBR 6118:2014 E ACI 318

**Marcos Vinício de Camargo¹, Lucas Augusto Milani Lopes²,
Gabriel Monteiro Motta³**

¹Centro Universitário Filadélfia de Londrina / Docente / Especialista / marcos.camargo@unifil.br

²Centro Universitário Filadélfia de Londrina / Docente / Mestre / lucas.milani@unifil.br

³Centro Universitário Filadélfia de Londrina / Discente / gabrielmt@edu.unifil.br

Resumo

Esta pesquisa tem como objetivo apresentar um comparativo entre metodologias de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado submetidas à flexão, utilizando polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC). O uso do PRFC como reforço estrutural surgiu como uma alternativa ao uso de chapas de aço, apresentando como principais características a sua leveza e alta resistência. Estes polímeros são compostos por fibras, estruturadas em uma matriz polimérica e são aplicados externamente ao substrato de concreto na forma de tecidos, laminados e barras. No Brasil, atualmente, não existe normalização técnica a respeito do reforço com PRFC, ficando assim o projetista sujeito a utilização de normas técnicas estrangeiras, como a do American Concrete Institute (ACI). O dimensionamento do reforço à flexão consiste em realizar o equilíbrio de forças normais que atuam na seção transversal existente do concreto, após a inserção do compósito de fibra, resistindo exclusivamente à tração, e, por conseguinte, determinar a capacidade resistente ao momento fletor da peça reforçada. Para o dimensionamento do reforço, é necessário conhecer a parcela resistente do concreto à compressão, que é calculada considerando um bloco retangular de tensões equivalente ao diagrama parábola-retângulo. A norma brasileira NBR 6118:2014 fornece os parâmetros referentes ao bloco retangular de tensões, que difere daqueles adotados na norma americana ACI 440.2R:08. Outra condição que difere é o valor do encurtamento último do concreto ϵ_{cu} , que é igual a 3,5‰ conforme consta na norma brasileira e 3,0‰ na norma americana. Os resultados apontam que a metodologia constante no ACI 318, quando utilizados parâmetros da mesma, se mostra menos conservadora do que quando utilizados parâmetros da NBR 6118.

Palavras-chave

Reforço estrutural. Concreto armado. Polímero reforçado com fibras de carbono. Comparativo NBR6118:2014 e ACI 318.

Introdução

Os compósitos estruturados com fibras de carbono têm sido amplamente utilizados para reforço e reabilitação de estruturas de concreto armado nos últimos anos, sendo superior em vários aspectos quando comparados aos métodos clássicos de reforço estrutural. Devido ao avanço da tecnologia e o crescimento do mercado da construção civil, este

sistema se tornou mais atraente devido a sua maior disponibilidade e também a significativa disseminação desse tema através de livros, periódicos e manuais a respeito de seu dimensionamento e execução.

Os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) possuem diversas vantagens, dentre elas: alta resistência mecânica, leveza, não-alteração das dimensões do elemento estrutural (devido a sua forma de tecido e laminado) e rapidez na execução. A característica de leveza, de acordo com Machado (2009), faz com que seja possível desconsiderar o peso próprio do sistema de reforço durante o dimensionamento.

Dentre as desvantagens, a principal é o alto custo do sistema quando comparado a outros, como, por exemplo, o reforço com chapas de aço. Outro fator que dificulta a utilização do PRFC no Brasil é a ausência de uma norma regulamentada sobre o tema, e isso faz com que os profissionais recorram a publicações e normas estrangeiras, como a norma americana do ACI.

O presente artigo almeja apresentar a metodologia de reforço a flexão com PRFC em peças de concreto armado conforme premissas do ACI 440, comparando o cálculo do momento resistente conforme a NBR 6118:2014 com o elaborado de acordo com o ACI 318. Essa comparação contribui para distinguir qual critério normativo resulta em uma resistência maior, e a diferença entre os valores obtidos, uma vez que os critérios que diferem são referentes ao encurtamento último do concreto e o bloco retangular de tensões adotado para cálculo.

Metodologia de reforço à flexão

A norma técnica a respeito do dimensionamento a flexão adotada neste trabalho é a ACI 440.2R:08 - *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, que discorre sobre a fabricação, dimensionamento e execução de reforço estrutural com PRFC em estruturas de concreto armado.

Ao considerar o reforço com PRFC para uma viga de concreto, é necessário verificar a sua viabilidade. Fatores que influenciam nessa decisão incluem orçamento, tempo, resistência final desejada, e, por último, a condição de ductilidade que a viga estará sujeita.

A NBR 6118:2014 define a condição de ductilidade em vigas, sendo a relação da linha neutra e altura útil da viga x/d limitada a 0,45 para concretos classe I e 0,35 para concretos classe II. Sendo assim, quando o reforço com PRFC impor ao elemento uma condição fora desse intervalo, o reforço é inviável. O mesmo vale na etapa de concepção, se a viga foi executada antes da imposição dessa limitação, há a possibilidade de ela estar fora desse intervalo.

Assim como no projeto de uma viga de concreto armado, uma viga reforçada com PRFC deverá ter como modo de falha imperante a ruptura por escoamento do aço ou ruptura do sistema composto. A deformação por descolamento do PRFC deverá também ser analisada, uma vez que este modo de falha deve imperar sobre a deformação limite de ruptura. Para que uma estrutura possa ser reforçada é necessário o conhecimento da seção transversal, resistência característica do concreto, armadura longitudinal e transversal sendo esta última utilizada para reforço ao cisalhamento, tema que não será abordado no presente artigo.

A metodologia de cálculo para se obter o valor do momento resistente da seção reforçada é feito com base no equilíbrio de solicitações normais que atuam na seção transversal da viga de concreto armado, onde a partir da inserção de uma área de PRFC (A_f) resistente à tração, é acrescentada a componente R_f .

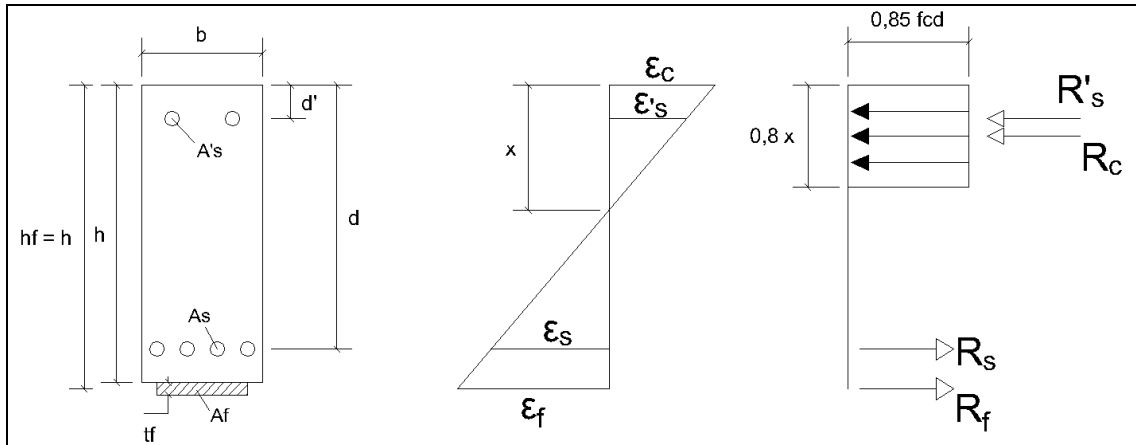


Figura 1 – Equilíbrio de solicitações normais na seção transversal de uma viga com reforço de PRFC

O momento fletor resistente da seção a ser reforçada é denominado M_n e o mesmo é obtido através do equilíbrio de esforços na seção transversal em torno de um ponto – onde a força R_c é aplicada. A equação 1 apresenta a metodologia para determinação de M_n .

$$\phi M_n = R_s \left(d - \frac{y}{2} \right) + R'_s \left(\frac{y}{2} - d' \right) + \Psi R_f \left(h - \frac{y}{2} \right) \quad (1)$$

Ademais, deve ser verificado o equilíbrio das forças resultantes, onde a somatória de todas as componentes horizontais deverá ser igual a 0, conforme equação 2.

$$R_c + \sigma'_s \cdot A'_s - \sigma_s \cdot A_s - \sigma_f \cdot A_f = 0 \quad (2)$$

A componente R_c é determinada de maneiras distintas entre as normas NBR 6118:2014 e ACI 318, ao qual será explanado na sequência.

Para o dimensionamento do reforço se faz necessário a determinação da deformação ϵ_{bi} , sendo essa a deformação existente no substrato no momento da aplicação do PRFC, quando a viga está submetida apenas a solicitação de seu peso próprio, que é feita de acordo com a equação 3.

$$\epsilon_{bi} = \frac{M_{DL} \cdot (h - x_2)}{(I_2 \cdot E_{cs})} \quad (3)$$

Onde o momento M_{DL} é referente ao momento característico advindo do peso próprio da seção transversal, a linha neutra x_2 e a inércia I_2 são calculadas considerando a seção fissurada e E_{cs} é o módulo de deformação secante do concreto.

Em seguida, realiza-se a determinação da deformação efetiva ϵ_{fe} no PRFC, conforme equação 4.

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_f - x}{x} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \quad (4)$$

Onde:

- ε_{cu} = encurtamento último do concreto
 d_f = profundidade efetiva do PRFC
 x = linha neutra
 ε_{fd} = deformação por descolamento

A deformação efetiva no PRFC deverá ser menor ou igual a deformação por descolamento ε_{fd} , que por sua vez é considerado modo de falha.

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f_{ck}}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu} \quad (5)$$

Onde:

- n = número de camadas do PRFC
 E_f = módulo de elasticidade do PRFC
 t_f = espessura do PRFC
 ε_{fu} = deformação última do PRFC

O ACI 440.2R-08 recomenda que a deformação por descolamento deverá ser igual ou inferior a $0,9 \varepsilon_{fu}$, que é a deformação do PRFC fornecida pela fabricante do material.

O dimensionamento do reforço com PRFC tem início após a escolha do material de reforço e determinação das propriedades e deformações existentes. Após definidas as variáveis supracitadas, é atribuído um valor para a linha neutra x , uma vez que a mesma é desconhecida, e verificado se a mesma converge no equilíbrio de seções, tornando assim o processo iterativo.

Para o equilíbrio das seções, é utilizada a equação 2, e a componente R_c pode ser definida de duas maneiras. A primeira, de acordo com a NBR 6118:2014, está descrita na equação 6:

$$R_c = 0,68 \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \quad (6)$$

A segunda, de acordo com o ACI 318, está descrita na equação 7:

$$R_c = \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot x \cdot b \cdot f_{ck} \quad (7)$$

Onde:

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2} \quad (8)$$

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad (9)$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 f_{ck}}{E_c} \quad (10)$$

O ACI 440 define um coeficiente de segurança Ψ_f para a resultante do PRFC, no valor de 0,85 para flexão. O momento resistente final, M_n , é multiplicado por um fator Φ , que é definido de acordo com o ACI 318, pela equação 11. Este fator está relacionado a redução de ductilidade do elemento a ser reforçado. É admitido que a seção reforçada apresenta nível aceitável de ductilidade se a deformação no aço, no momento da ruptura

por esmagamento do concreto comprimido e no momento do descolamento do PRFC do substrato for superior a 0,005.

$$\Phi \left\{ \begin{array}{l} 0,90 \text{ para } \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{yd})}{0,005 - \varepsilon_{yd}} \text{ para } \varepsilon_{yd} < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,65 \text{ para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd} \end{array} \right. \quad (11)$$

O momento resistente da equação 1 pode ser reescrito da seguinte maneira:

$$\phi M_n = A_s \cdot \sigma_s \left(d - \frac{y}{2} \right) + A'_s \cdot \sigma'_s \left(\frac{y}{2} - d' \right) + 0,85 (A_f \cdot \sigma_f) \left(h - \frac{y}{2} \right) \quad (12)$$

A condição que estabelece a segurança no reforço com PRFC conforme o ACI 440. 2R-08 é apresentada a seguir:

$$\phi M_n \geq M_u \quad (13)$$

Onde:

M_u = momento fletor solicitante

Considera-se, portanto, dois fatores a diferenciar as duas normas. O primeiro deles é o valor do encurtamento último, ε_{cu} , que é de 3,5‰ para a norma brasileira e de 3,0‰ para a norma americana. O segundo fator é a metodologia para determinação de R_c , que é descrita pela equação 6 conforme norma brasileira, e pela equação 7 conforme norma americana.

Resultados e discussão

Neste trabalho, foram idealizadas três seções transversais de vigas de concreto armado distintas, para análise da aplicação de diferentes valores de PRFC em relação as duas normas. As seções são apresentadas abaixo, e na sua sequência, os valores encontrados. Para cada seção foram atribuídas 4 taxas distintas de PRFC, e para cada uma, foi encontrado o valor do momento resistente da seção reforçada.

O primeiro exemplo é uma viga de concreto armado com seção transversal 20x50cm, concreto de f_{ck} 25, aço CA-50, armadura longitudinal $A_s = 8,04 \text{ cm}^2$, $d = 45 \text{ cm}$. O valor do momento fletor resistente, sem qualquer reforço, é de $\phi M_n = 124,29 \text{ kN.m}$ e foi considerado um esforço solicitante de $M_u = 142,20 \text{ kN.m}$, obtido de acordo com a metodologia constante no ACI 318, impondo assim a necessidade de reforço.

Para o PRFC, foi adotado o valor de 1,7% para a deformação limite de ruptura e 600 MPa para a tensão limite de ruptura. O PRFC é plotado na imagem como taxa de reforço, obtida em função de A_f/A_c . É apresentado, juntamente aos valores de momento fletor encontrado, na figura 2.

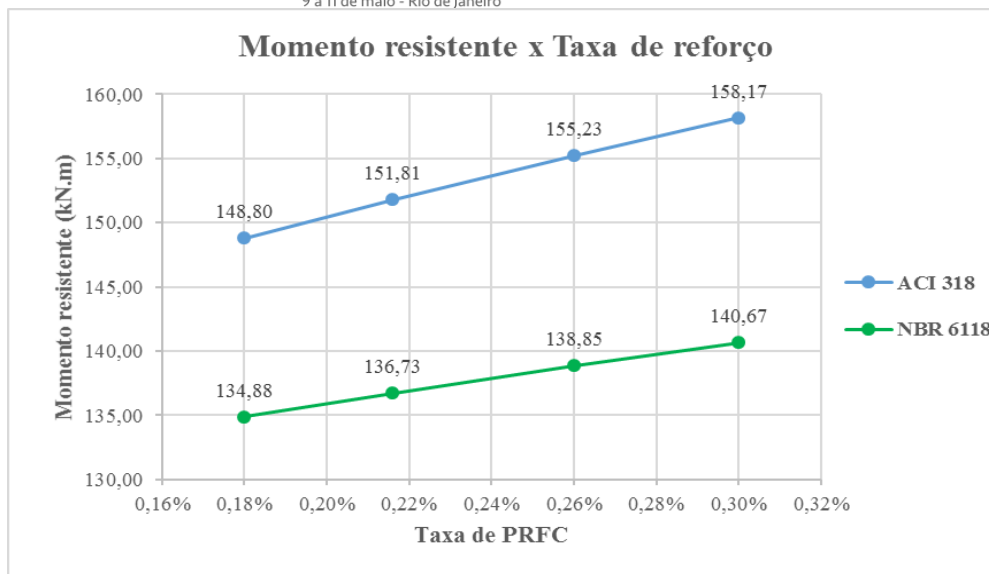


Figura 2 – Exemplo 1

Em todas as variações de taxa, o valor do momento resistente encontrado seguindo as recomendações da norma brasileira foram inferiores ao do ACI. O aumento da resistência ao momento fletor conforme a variação de taxa de reforço também foi maior com as recomendações da norma americana. Cumpre salientar que, para o exemplo 1, o mesmo sistema de reforço calculado com as recomendações da NBR 6118 não é suficiente para resistir ao esforço solicitante.

Para o segundo exemplo, foi idealizada uma viga de concreto armado com seção transversal 20x50cm, concreto de f_{ck} 25, aço CA-50, armadura longitudinal $A_s = 4,91$ cm², $d = 45$ cm. O valor do momento fletor resistente é $\phi M_n = 79,74$ kN.m e o solicitante $M_u = 98,78$ kN.m, obtidos de maneira análoga ao exemplo 1.

Foi utilizada a mesma taxa de reforço do exemplo 1, e os resultados podem ser visualizados na figura 3.

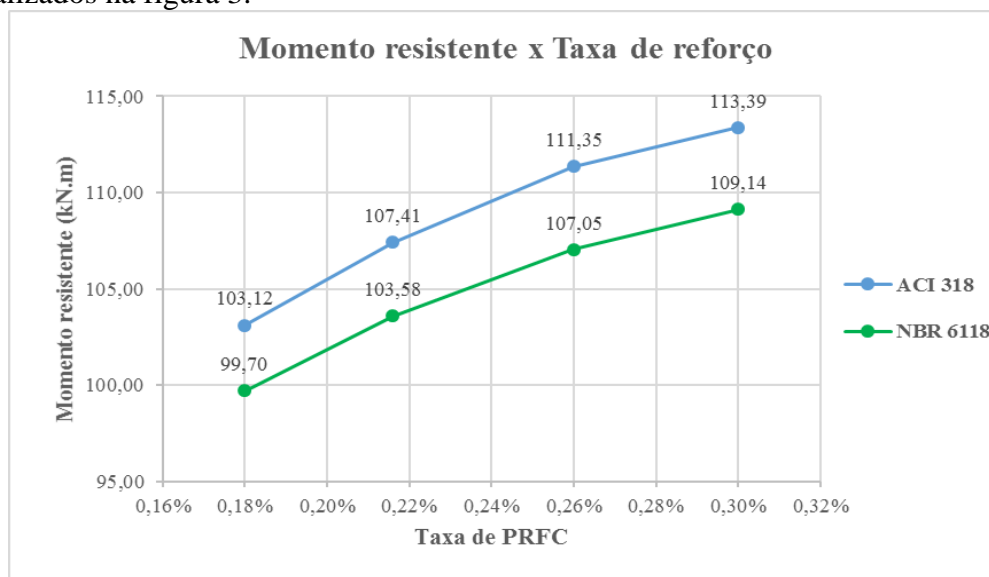


Figura 3 – Exemplo 2

No segundo exemplo, com a mesma variação da taxa de PRFC, a diferença entre as normas foi menor. Neste caso, o cálculo pela norma brasileira obteve todos os valores superiores ao esforço solicitante, sendo considerado suficiente o reforço.

A terceira seção transversal é de 20x60cm, concreto de f_{ck} 25, aço CA-50, armadura longitudinal $A_s = 13,20 \text{ cm}^2$, $d = 55 \text{ cm}$. O valor do momento fletor resistente é $\phi M_n = 212,56 \text{ kN.m}$ e o solicitante $M_u = 264,00 \text{ kN.m}$, obtidos analogamente ao exemplo 1. O mesmo PRFC dos exemplos anteriores é adotado, e a taxa de reforço e os resultados estão descritos na figura 4.

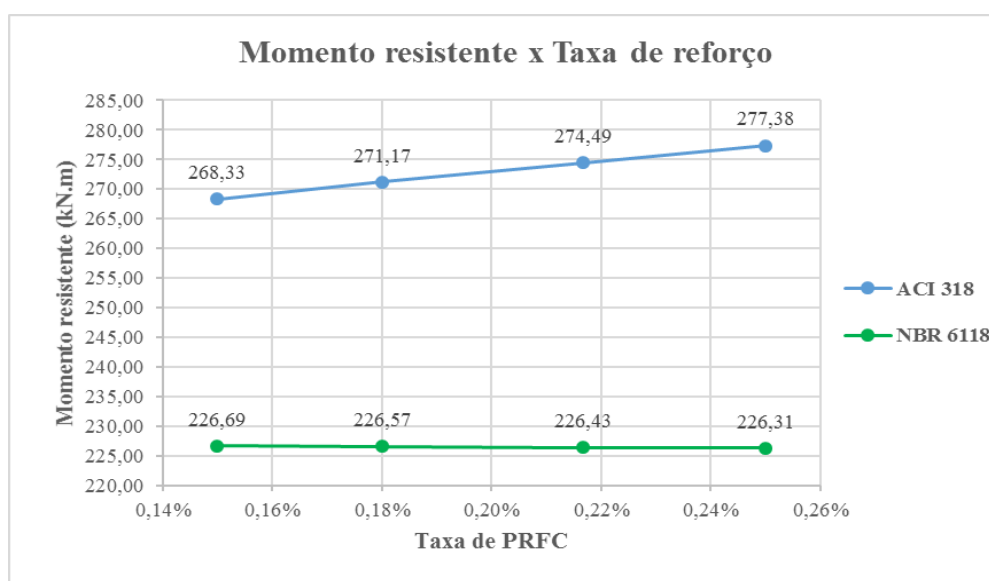


Figura 4 – Exemplo 3

Neste último exemplo, os valores de momento fletor obtidos no cálculo com os critérios da NBR 6118 foram decrescendo conforme o aumento da taxa de reforço. A seção após o reforço também ficou fora do intervalo necessário da condição de ductilidade ($x/d \leq 0,45$).

Conclusões

A partir da análise dos exemplos foi possível identificar que as diferenças entre as duas normas também variam conforme o tipo de estrutura a ser reforçada. Os três exemplos concebidos são ligeiramente semelhantes, sendo que a diferença entre eles está na quantidade de armadura da viga e qual domínio a mesma está sujeita.

No primeiro caso foi possível concluir que a diferença entre a NBR e o ACI foi significativa, sendo que os valores de momento fletor resistente encontrados com os critérios da norma brasileira não foram suficientes para resistir as solicitações. Os valores encontrados com os critérios do ACI foram superiores, em média, 11,4% em relação a NBR.

No segundo caso, a seção dispunha de menos armadura longitudinal e tinha uma resistência menor que o primeiro. A diferença no cálculo foi mais sutil, e todos os

valores obtidos foram suficientes para resistir as solicitações. Neste exemplo, os valores encontrados segundo a metodologia do ACI foram superiores, em média, 3,76% em relação a da NBR.

O último exemplo se trata de uma seção com maior quantidade de armadura e solicitações maiores. Neste, o cálculo aplicando as considerações da NBR 6118 foi contraditório. Conforme a taxa de PRFC aumentava, o momento resistente diminuía, o que fez possível concluir que a partir de um determinado valor o reforço concebido se tornou inviável, além de que a seção estava fora dos limites de ductilidade. Porém, com as considerações do ACI 318, a seção poderia ser reforçada com a taxa descrita. A porcentagem média dos valores encontrados pelo ACI, em relação a aqueles encontrados pela NBR, foi de 20,46%.

Foi observado um aumento sutil da diferença entre os valores obtidos por cada norma conforme o aumento da taxa de reforço, podendo os mesmos serem desprezados. Porém, foi constatado que a diferença é menor em seções com a posição da linha neutra menos profunda.

A utilização dos parâmetros constantes na NBR 6118, nas análises efetuadas, se mostraram menos eficiente que os existentes no ACI 318, para o cálculo de reforço a flexão com PRFC. Cumpre salientar que os valores de PRFC utilizados foram iguais para as duas metodologias, uma vez que o objetivo era comparar os parâmetros das duas normas, ou seja, é possível de se obter valores diferentes e/ou superiores em cada uma das duas metodologias, dependendo apenas do refinamento que é realizado no dimensionamento.

Por fim, este estudo não contempla possíveis coeficientes de minoração e majoração que uma norma brasileira de reforço com PRFC pode conter. A aplicação dos conceitos da norma brasileira é limitada, pois algumas outras etapas só são descritas na norma americana. A princípio, se torna ineficiente a mesclagem entre as duas metodologias, sendo necessário um estudo avançado para formulação e adaptação em uma possível norma brasileira para reforço com PRFC.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete. 2014.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R – Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118/2014 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- FIB. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Bulletin 14, 2001.
- MACHADO, A. P. Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono. São Paulo: Viapol, 2009.